



Les TRAIts de la faune du sol pour relier les Changements Environnementaux aux fonctions du Sol

(TRACES)

The soil fauna TRAIts to link the Changes of Environment to Soil functions

DUBS Florence (coord.)

IRD-UMR BIOEMCO. 32, Av. H de Varagnat. 93143 Bondy Cedex

Rapport final

30 JANV 2014

Numéro de contrat Ministère/ADEME : CON -année 2009 -nOS.5-0006540

Ce projet répond à l'axe 1 de l'appel à proposition de recherche 'sols et développement durable' (i) *Observer et évaluer les fonctions du sol et les services rendus à la société* du programme GESSOL3.

Contexte général

Le rôle du sol est reconnu dans les politiques publiques au niveau européen comme en témoigne la création de l'European Community Biodiversity Strategy et de l'EU Thematic Strategy for Soil Protection. Ces deux politiques publiques reconnaissent pleinement la biodiversité du sol comme une composante essentielle de l'intégrité des écosystèmes. Un nombre croissant d'accords multilatéraux, ratifié par l'EU (incluant UNFCCC, CBD et UNCCD) demandent des données et des informations sur le sol, sa biodiversité et les liens avec la dégradation de la qualité des sols. Les besoins d'indicateurs et de méthodes d'évaluation s'expriment dans de nombreux programmes scientifiques nationaux et internationaux. Le rapport Millennium Ecosystem Assessment qui fait le bilan de l'état des écosystèmes et de leurs services à l'échelle planétaire reconnaît le rôle central de la biodiversité dans la mise à disposition de la plupart des services écosystémiques, qu'ils soient de production, d'entretien, de nature culturelle ou esthétique. En termes de politiques publiques, on voit donc bien l'intérêt de porter une attention accrue aux fonctions écologiques des écosystèmes car elles sont au cœur de la relation entre la biodiversité et les services écologiques.

Dans le sol, les principaux processus (recyclage de la matière organique et des nutriments, entretien de la structure physique et des propriétés hydrauliques associées) sont régulés par les organismes du sol (faune et racines, et la microflore qu'ils stimulent). Le sol rend un ensemble de services écosystémiques : production de fibre et énergie, stockage et épuration de l'eau, séquestration de carbone, recyclage de nutriments et traitement des déchets ainsi que conservation d'une biodiversité aussi riche que méconnue. Ils sont cependant de plus en plus menacés par des pratiques agricoles non durables, les pollutions d'origine anthropique et les changements globaux. Ces services écosystémiques du sol sont vulnérables et les mécanismes de leur fourniture encore mal compris. Le sol n'est pas une ressource inépuisable et les mauvaises pratiques de gestion peuvent générer des dégradations rapides et limiter sérieusement ses possibilités de régénération ultérieure. La perte de biodiversité est l'un des principaux facteurs de dégradation des services écosystémiques et de perte de résilience des écosystèmes.

Au sein des écosystèmes terrestres, le sol est l'un des habitats les plus riches en biodiversité. Paradoxalement, nos connaissances actuelles de la taxonomie et des fonctions écologiques des organismes du sol restent des plus faibles. ***La biodiversité est un facteur essentiel à la production des services écosystémiques et doit donc être nécessairement au cœur de toute approche portant sur l'évaluation des fonctions écologiques et l'évaluation de l'effet des activités humaines sur les fonctions du sol et sa diversité est essentielle pour la mise en œuvre de politique de gestion des sols.*** La réalisation de cette évaluation demande des outils précis et fiables qui, pour l'essentiel, n'existent pas encore. Elle demande aussi de sortir des approches compartimentées par discipline (pédologie, taxonomie, écologie du sol) et de croiser les théories venant de champs différents de l'écologie (écologie végétale, écologie des communautés, écologie du paysage) pour les appliquer à l'écologie du sol. C'est pourquoi, en intégrant des champs théoriques venant de différents champs disciplinaires, ce projet a pour but de quantifier les traits de réponse et d'effet de certains assemblages d'espèces dominants au sein des invertébrés du sol (macrofaune saprophage, collembole) et d'identifier l'effet de la structure du paysage proche sur ces communautés locales. Plus précisément, il a été question :

- 1, de décrire l'impact sur les assemblages locaux d'espèce des facteurs locaux et paysagers ;
- 2, d'étudier les mécanismes biologiques (dispersion, préférences d'habitat, compétition) qui conditionnent ces assemblages ;
- 3, d'étudier l'impact d'espèces saprophages sur le fonctionnement du sol ;
- 4, d'identifier les traits expliquant les réponses et les effets des assemblages de faune du sol.

Puis de concevoir un modèle de spatialisation des règles d'assemblage afin d'analyser, en se basant sur les mécanismes sous-jacent, l'impact de la dynamique du paysage sur la diversité et l'abondance des assemblages d'invertébrés.

Objectifs généraux du projet

Ce projet s'articule sur l'analyse de l'impact des filtres environnementaux (de la tache d'habitat à la structure du paysage) sur la diversité de la faune du sol. L'hypothèse centrale du projet est que la biodiversité du sol est pilotée par des filtres environnementaux agissant dans un contexte régional, que la composition du sol et sa diversité se comprend avec les traits de réponse des espèces, et que certaines des caractéristiques des espèces (capacité de fragmentation / dégradation de la matière organique) peuvent être utilisées pour évaluer l'impact d'une communauté du sol sur une fonction du sol (recyclage de la matière organique). Plus précisément, les hypothèses sont :

- (i) les filtres environnementaux (des contraintes d'habitats à la structure des paysages) pilotent la composition et la diversité des assemblages de faune du sol,
- (ii) les traits de réponse des espèces permettent de comprendre ces réponses,
- (iii) il est possible de prédire l'effet d'un assemblage local sur une fonction du sol par la connaissance des traits d'effets des espèces qui le constituent,
- (iv) l'articulation entre les changements environnementaux, la diversité des organismes du sol et les services du sol peut se faire par le biais des traits de réponse et d'effet.

La première partie de ce projet porte sur l'effet des filtres environnementaux sur la distribution de la faune du sol en analysant : (i) le poids des filtres environnementaux pour en conclure sur les modèles de fonctionnement de métacommunauté à l'œuvre en ce qui concerne la faune du sol (1.1.), et (ii) l'effet de l'intensification locale de l'usage du sol et l'effet du paysage proche sur la diversité fonctionnelle des communautés de faune du sol (1.2.).

Par ailleurs, plusieurs expériences ont été réalisées pour travailler sur les traits de réponse et les traits d'effets afin : (iii) d'évaluer les préférences des collemboles pour le sol et le microclimat en milieu forestier ou en milieu prairiale (2.1.1.), (iv) d'identifier l'effet des ressources alimentaires sur les schémas de déplacement des collemboles (2.1.2.), (v) de mesurer l'effet des micro-organismes sur le comportement exploratoire des vers de terre (2.1.3.) et, enfin, (vi) de quantifier les traits d'effet de plusieurs espèces de vers de terre (2.2.).

Pour finir, la troisième partie de ce projet porte sur (vii) la conception d'un modèle multi-agents pour analyser les mécanismes de réponse de la biodiversité du sol à la dynamique du paysage (3.1.).

Question 1. FILTRE 'MOSAIQUE D'HABITAT'**1.1. Poids des filtres environnementaux et modèles de fonctionnement métacommunauté**

Le but est d'analyser l'**importance relative des différents facteurs environnementaux** qui expliquent la structure des communautés de faune du sol. Ces effets sont testés sur deux échelles spatiales : l'échelle locale (caractéristiques de l'habitat au niveau de la parcelle) et l'échelle paysagère (structure du paysage proche). Tout d'abord, nous faisons l'hypothèse que le long de forts gradients environnementaux dus à l'intensification des usages du sol, la distribution des espèces est essentiellement pilotée par des processus écologiques déterministes. Deuxièmement, que les facteurs locaux, expliquant directement les changements dans les communautés soient fortement dépendant des facteurs du paysage, lesquels exercent un contrôle indirect sur ces communautés en ayant un effet direct sur les conditions locales. Enfin, qu'il n'y a pas un seul modèle de métacommunauté ('niche assembly' vs. 'dispersal assembly') expliquant les tendances observées dans la structure des communautés locales car la fragmentation des habitats comme le paysage ont un impact sur les communautés de faune du sol.

1.2. Diversité fonctionnelle des communautés locales de faune détritivores du sol : l'effet du paysage proche

La théorie écologique prédit que plusieurs facteurs environnementaux déterminent les assemblages locaux d'espèces en filtrant progressivement les espèces du pool régional d'espèces. Ces filtres successifs influencent les différentes composantes de la **diversité fonctionnelle** d'un assemblage d'espèces. Il s'agit ici de tester empiriquement l'hypothèse selon laquelle les facteurs environnementaux agissent comme des filtres hiérarchiques sur la structure fonctionnelle des communautés de faune du sol et que les différents indices de diversité fonctionnelle ont des réponses différentes au filtrage de l'environnement.

Question 2. TRAITS DE REPONSE & TRAITS D'EFFET :

Plusieurs approches expérimentales ont été développées au cours de ce projet afin de quantifier des traits de réponse (2.1.) et des traits d'effet (2.2.) pour différents taxons de la faune du sol.

2.1. Traits de réponse – approche expérimentale

2.1.1. Expérience d'exclo-in situ : «Évaluation expérimentale des préférences des collemboles pour le sol et le microclimat dans les communautés de forêt et de prairie »

Le protocole expérimental mis en place permet de répondre à plusieurs questions : (1) Est-ce que les espèces forestières ou prairiales exclues (ou moins abondantes dans) des prairies ou des forêts, respectivement, le sont parce qu'elles ne tolèrent pas les différences de température et d'humidité du sol connexes (microclimat), ou parce qu'elles n'ont pas trouvé les ressources trophiques et les conditions physico-chimiques appropriées (nature du sol) ? (2) Est-ce que les espèces généralistes sont généralistes pour le sol et le microclimat ? Les hypothèses sont que (1) les espèces forestières ne sont pas présentes (ou sont moins abondantes) dans les prairies en raison d'un besoin écophysologique pour un microclimat forestier (c'est à dire besoin de plus d'humidité et de températures basses et tamponnées) alors que (2) les espèces de prairie ne sont pas présentes (ou sont moins abondantes) dans les forêts parce qu'elles n'y trouvent pas les ressources trophiques appropriées.

2.1.2. Expériences en laboratoire : «Les schémas de déplacement des assemblages de collembole impactés par les ressources alimentaires »

Bien qu'il existe plusieurs études focalisées sur la dispersion des collemboles, peu ont porté sur la recherche de nourriture. La capacité de déplacement se rapporte, en plus d'autres facteurs, aux capacités de locomotion. Comparativement les grands collemboles épédaphiques ayant de bonnes aptitudes de saut et les pattes bien développées devraient être des migrants plus efficaces que les espèces euédaphiques. Cependant, les espèces avec un sens de la perception de leur environnement plus développé pourraient également avoir une forte probabilité de se déplacer avec succès vers une source de nourriture. Dans cette étude, nous testerons 1) l'influence de l'odeur d'une source alimentaire éloignée sur le déplacement des collemboles, et 2) si les formes de vie des collemboles peuvent présenter un indicateur fiable de la capacité de déplacement.

2.1.3. Expériences en laboratoire : «Influence des communautés de micro-organismes sur le comportement exploratoire des vers de terre »

Cette étude expérimentale porte sur l'influence des microorganismes sur le déplacement des vers de terre. Les objectifs sont (1) de tester expérimentalement l'hypothèse selon laquelle le comportement d'exploration des vers de terre est influencé par un type de communauté microbienne particulier, (2) de déterminer si ce comportement diffère selon l'espèce ou le groupe écologique considéré, et (3) de tester l'influence des niveaux de densité intra-spécifique des vers de terre sur leur comportement exploratoire.

2.2. Traits d'effets : étude en cosmes

L'objectif de cette étude est de quantifier et de comparer l'effet de plusieurs espèces de vers de terre sur l'agrégation, la stabilité de la structure et la dynamique des matières organiques de sols aux caractéristiques contrastées. L'hypothèse est qu'il est possible d'établir des groupes fonctionnels d'effet des espèces lombriciennes. L'approche expérimentale pour quantifier certains traits d'effet d'espèces lombriciennes sur le fonctionnement des sols consiste en la mise en place de microcosmes comprenant des combinaisons de sols et d'espèces de vers de terre en conditions contrôlées de laboratoire. Différents types de sol du Bassin Parisien, quatre sols (Luvisol, Calcisol, Reductisol et Colluviosol) et un sol Morvandiau (Brunisol) sous trois usages (pelouse, prairie permanent et grande culture), ont été incubés en présence ou absence de plusieurs espèces de vers de terre.

Question 3. MODELISATION

3.1. Réponse des communautés de collemboles à la dynamique du paysage: une modélisation multi agent à l'échelle de la population

Le modèle théorique des règles d'assemblage des communautés locales de faune postule que les espèces observées dans l'assemblage (niveau local) sont celles qui sont présentes dans le pool régional et qui ont passé les filtres environnementaux liés aux interactions interspécifiques, aux conditions d'habitat et à la structure du paysage environnant. L'objectif ici est de concevoir un modèle permettant de mieux comprendre la distribution des espèces de collemboles au sein d'un paysage hétérogène en y intégrant la préférence des espèces pour un type d'habitat ainsi que leurs capacités de dispersion. C'est un modèle dynamique qui inclue des scénarios de dynamique du paysage. Le travail présente ici la conception et le développement du modèle.

Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)**Question 1. FILTRE 'MOSAIQUE D'HABITAT'****1.1. Poids des filtres environnementaux et modèles de fonctionnement métacommunauté**

La partition de variance permet de quantifier les relations espèces-environnement par analyse de redondance partielle. Les mêmes variables explicatives sont utilisées pour toutes les analyses afin de permettre des comparaisons fiables entre groupes taxonomiques. Cela permet aussi de comparer des facteurs environnementaux agissant à différentes échelles. La partition de variance entre variables spatiales et environnementales permet aussi d'identifier le modèle de métacommunauté à l'œuvre dans la structuration des peuplements locaux. Dans le cas où seul les facteurs spatiaux sont significatifs, le modèle de métacommunauté sous-jacent est soit le modèle neutre, soit le 'patch dynamic', indiquant un rôle de la dispersion dans la structuration de la communauté. Si seul les facteurs environnementaux sont significatifs alors c'est le modèle 'species sorting' qui gouverne le peuplement. Et lorsque les deux sont significatifs alors il n'est pas possible de trancher entre le modèle 'species sorting' et le modèle 'mass effect', indiquant un effet conjoint des contraintes d'habitat et des contraintes de dispersion.

1.2. Diversité fonctionnelle des communautés locales de faune détritivores du sol : l'effet du paysage proche

Nous avons renseigné, à partir des faunes, synopsis, atlas et monographies, les traits morphologiques suivant : pigmentation, longueur et largeur et les traits écologiques suivant : habitat, micro-habitat, régime trophique pour 68 espèces de la faune du sol (vers de terre, diplopoies, chilopodes et isopodes). Ces traits sont codés en codage flou, ce qui permet d'intégrer dans les mesures de diversité fonctionnelle des traits de natures numérique et textuelle. La diversité fonctionnelle peut se résumer par trois indicateurs : la richesse fonctionnelle reflétant la quantité de la variabilité des traits fonctionnels dans un assemblage d'espèces donné ; l'équitabilité fonctionnelle indiquant la régularité de la distribution de l'abondance à travers les traits des espèces et la divergence fonctionnelle capturant le degré de divergence dans la distribution de l'abondance des traits fonctionnels des espèces.

Question 2. TRAITS DE REPONSE & TRAITS D'EFFET :**2.2. Traits de réponse – approche expérimentale****2.1.1. Expérience d'exclo-*in situ* : «Évaluation expérimentale des préférences des collemboles pour le sol et le microclimat dans les communautés de forêt et de prairie »**

Une expérimentation *in situ* a été mise en place entre Mars et Juin 2011 et a pris fin au début de Novembre 2011. Elle a eu pour but de tester la résistance du peuplement de collemboles aux microclimats, aux types de sol et aux relations de compétition interspécifique. Cette expérimentation consiste en la constitution de cosme isolé de bloc de sol de 10 cm de profondeur sur 20 cm de diamètre (plus la litière le cas échéant) remis ou non dans leur milieu d'origine. La particularité de ce protocole est de manipuler les communautés de collemboles afin de différencier l'effet du microclimat de l'effet du type de sol dans la persistance des espèces. Concrètement les blocs de sol ont été défaunés par congélation à l'azote liquide deux fois puis réinoculés par une communauté d'origine forestière, prairiale, ce qui donne en tout 8 traitements ayant chacun 5 réplicats. Afin de faire les comparaisons avec la situation réelle, des prélèvements *in situ* des peuplements à l'installation et au démontage de l'expérience ont été faits. Des témoins des manipulations expérimentales ont aussi été mis en place pour tester la qualité de la défaunation, la qualité de la réinoculation et la qualité de l'isolement du bloc.

2.1.2. Expériences en laboratoire : «Les schémas de déplacement des assemblages de collembole impactés par les ressources alimentaires »

Plusieurs tests de dispersion/de choix ont été réalisés durant la première année du projet. Les microcosmes, en tubes en plastique (longueur 25 cm, diamètre 6 cm) se compose de cinq sections séparées 5cm liés avec du ruban adhésif, scellé à chaque extrémité avec un bouchon en plastique percé et couvert avec une toile de maille fine (250 µm) pour empêcher la fuite des animaux. Pour tous les tests, les milieux organiques qui remplissent les compartiments 1 à 5 dans les microcosmes ont d'abord été stérilisés par autoclavage à 105 °C, puis tamisés à 5mm et soigneusement mélangés. Seule la dernière partie des microcosmes (section 5) différencie les traitements:

- « contrôle », aucun traitement sur le substrat de la section 5 par rapport aux autres sections,

- « microflore », les milieux organiques stérilisés dans la section 5 ont été réinoculés avec de la microflore par une suspension de microflore,
- « plante », en plus du traitement « microflore », une semaine après réensemencement de la microflore, une plante (*Endymion non-scripta*) a été ajoutée.

2.1.3. Expériences en laboratoire : «Influence des communautés de micro-organismes sur le comportement exploratoire des vers de terre »

Afin de tester si les communautés de microorganismes influencent le comportement exploratoire des vers de terre, une expérimentation dans un dispositif type olfactomètre a été réalisée. Ce dispositif se constitue : d'une chambre centrale composée d'un cylindre central de PVC d'une hauteur d'environ 40 cm et d'un diamètre de 20 cm et de trois bras latéraux composés de cylindres de PVC de 9 cm de diamètre et de 20 cm de long, et placés à équidistance les uns des autres. Dans la zone terminale de chacun des bras (5cm), un traitement différent a été appliqué. L'ensemble du dispositif a été rempli avec un sol de type rendosol tamisé à 2 mm et stérilisé en deux cycles à l'autoclave à 100°C, espacés de 24 à 48h. La chambre centrale a ainsi été remplie avec du sol stérilisé et du sable minéral (au fond de la chambre). Les trois bras ont chacun reçu du sol stérilisé. Lors des expérimentations, les dispositifs ont été assemblés et placés dans une chambre obscure et calme, à température constante (22 ± 2 °C). Entre les séries, les différentes pièces du dispositif ont été nettoyées avec de l'alcool et séchées dans une étuve ventilée afin d'éliminer toute odeur éventuelle.

2.2. Traits d'effets : étude en cosmes

L'approche expérimentale pour quantifier certains traits d'effet d'espèce de la macrofaune détritivore consiste en la mise en place de microcosmes comprenant des combinaisons type de sol x espèce de vers de terre pendant 21 jours en conditions contrôlées de laboratoire. Après expérimentation sont mesurés la minéralisation du C et dans les biostructures créées par les animaux des paramètres liés à la dynamique de la matière organique, à l'agrégation et à l'activité microbienne. Sur les différents types de sol sélectionnés, quatre sont incubés en présence ou absence de 4 espèces de vers de terre. Ce travail a nécessité la mise en place d'une chambre thermorégulée d'élevage et d'expérimentation de 6 m², dont la construction a été achevée en fin d'hiver 2011. Initialement, il était prévu de s'intéresser à six espèces lombriciennes. Ces espèces diffèrent par leur taille et leur localisation dans le sol et appartiennent à deux catégories éco-morphologiques : les endogés et les anéciques. Tous les individus ont été collectés dans des sols agricoles et prairiaux du centre de Versailles-Grignon, à proximité ou dans l'essai dit de « La Cage ». Les animaux ont été placés dans des bacs « restaurant » contenant du sol de la parcelle où ils ont été prélevés en attendant le début de l'expérimentation. Les travaux ont porté à la fois sur les animaux adultes et juvéniles des espèces.

Question 3. MODELISATION

3.1. Réponse des communautés de collemboles à la dynamique du paysage: une modélisation multi agent à l'échelle de la population

Le développement d'un modèle informatique permettant de modéliser la réponse de la biodiversité de la faune du sol à la dynamique du paysage a été fait en collaboration avec N. Marilleau de l'UMI Ummisco. L'intérêt de cette collaboration est la maîtrise par cette équipe de plateforme de modélisation de système multi-agents (SMA). Les SMA sont particulièrement adaptés à notre cas car ils permettent de représenter explicitement le territoire et les dynamiques qui s'y opèrent.

Pour modéliser la dynamique de la biodiversité, nous avons pris en compte le nombre, l'abondance et la distribution spatiale des espèces. Par souci de parcimonie, d'intelligibilité et pour limiter les coûts de calcul, nous avons choisi de modéliser au niveau de la population. Celles- servent à regrouper et à mettre à disposition un ensemble de paramètres tels que l'abondance des individus, la surface totale et la capacité de support de la parcelle associée. Chaque agent représente un ensemble de collemboles c.à.d. une population spatialement définie par une position géographique (un lieu de vie, une parcelle), une démographie (dynamique de population) et des caractéristiques (profil d'espèce basé sur la préférence d'habitat et la mobilité). Le SMA permet de représenter le paysage et sa dynamique de façon explicite. Chaque parcelle du paysage se distingue selon ses attributs (i.e. usages du sol), lesquels peuvent changer au cours du temps. Trois usages du sol sont représentés : milieu forestier, milieu agricole et surface hostile (route, maison, chemin, ruisseau). Une espèce pourra établir des populations dans les parcelles dont l'usage du sol correspond à sa préférence d'habitat. Sa dispersion dépendra de son seuil de tolérance à la densité (i.e. dispersion densité dépendante) et de la nature des parcelles environnant celle d'où les individus dispersent. Le modèle permet donc de suivre le nombre d'individus de chaque espèce dans chaque parcelle.

Résultats obtenus

Question 1. FILTRE 'MOSAÏQUE D'HABITAT'

1.1. Poids des filtres environnementaux et modèles de fonctionnement métacommunauté

Les facteurs locaux de l'habitat et les facteurs du paysage ont des impacts divers, en fonction du taxon considéré. En raison de la réponse différenciée de chaque taxon, il est important, si l'on souhaite gérer ces populations, de considérer la gestion des facteurs locaux et/ou paysagers en fonction de leur intérêt pour chacun des assemblages d'espèces de faune du sol. Ainsi, la réponse de la biodiversité du sol ne semble pas pouvoir se résumer par un seul taxon, chacun réagissant spécifiquement aux mêmes conditions environnementales.

En majorité, les communautés de faune du sol sont gouvernées par la sélection de l'habitat (species sorting). C'est le cas pour les diplopodes, les isopodes et les chilopodes dans les deux régions d'étude ainsi que pour les collemboles en Normandie, indiquant pour ces taxons une adéquation de la distribution des espèces à la niche écologique. Cependant dans trois cas, l'effet conditionnel du spatial influence la structuration de la communauté : chez les vers de terre, dans les deux régions d'étude et chez les collemboles, dans le Morvan. Pour les vers de terre du Morvan et les collemboles en Normandie, les facteurs environnementaux et spatiaux jouent tout deux un rôle dans la distribution des espèces, indiquant que celle-ci résulte d'un compromis entre adéquation à la niche et processus de dispersion. Les résultats obtenus ici pour les vers de terre en Normandie sont cependant assez troublants. En effet, nous trouvons que seul le spatial a un effet, ce qui indique une structuration par la seule dispersion. Il faut cependant noter la très forte part conjointe entre le spatial et l'environnement, telle qu'il n'est pas possible d'exclure un effet des filtres environnementaux sur cette distribution et laisse supposer que ce contrôle n'est pas indépendant d'un contrôle conjoint du spatial sur ces filtres environnementaux. Ce contrôle des facteurs du milieu sur la distribution des vers de terre est d'ailleurs établi dans la région

Si, en majorité l'on peut conclure que les espèces de la faune du sol se répartissent en fonction des niches disponibles et selon les différents filtres environnementaux, la dispersion à l'échelle du paysage semble jouer aussi un rôle pour le cas des vers de terre en Normandie et dans le Morvan ainsi que pour les collemboles du Morvan, soit par des mécanismes de dispersion qui homogénéisent la distribution des espèces dans les habitats (mass effect), soit par un équilibre entre mécanismes de compétition et de colonisation dans le cas des vers de terre en Normandie (patch dynamics).

1.2. Diversité fonctionnelle des communautés locales de faune détritviores du sol : l'effet du paysage proche

Que ce soit en milieu ouvert ou en milieu fermé, le type de paysage proche façonne la communauté fonctionnelle de faune du sol en la rendant d'autant plus diverse que le contraste paysager augmente, tandis qu'une intensification de l'usage du sol (en milieu ouvert ou en milieu fermé) entraîne une perte de redondance fonctionnelle de cette diversité fonctionnelle préalablement filtrée par le paysage proche :

- le nombre d'espèce est sensiblement plus élevé en milieu ouvert qu'en milieu fermé tandis que c'est l'inverse pour la diversité fonctionnelle ;
- que ce soit en milieu ouvert ou fermé, l'intensification de l'usage du sol entraîne une perte d'espèce sans modifier la diversité fonctionnelle, ce qui fragilise la communauté par perte de redondance fonctionnelle ;
- le contraste du paysage, quelque soit le milieu, augmente la diversité fonctionnelle sans modifier le nombre d'espèce, avec en milieu fermé, une plus grande proportion d'individus vivant dans le sol et une moins grande proportion dans la litière, tandis que c'est l'inverse en milieu ouvert (gain d'individus de litière, zoophage ou détritvior et perte d'individus vivant dans le sol, géophage et de grande taille).

Il est notable de constater que, pour un milieu donné (fermé ou ouvert), l'habitat local et le paysage proche ne filtrent pas les mêmes traits, excepté pour le seul cas des détritviores qui diminuent en culture par rapport aux prairies et aussi lorsque le paysage proche s'ouvre. Ainsi le filtrage des traits en plus d'être hiérarchique (le type de paysage proche filtre des individus avec des traits dissimilaires puis le type d'habitat filtre, au sein de ce pool, des individus aux traits similaires) est aussi différent pour chaque filtre selon le type d'habitat local. En milieu fermé, l'ouverture du paysage proche filtre les traits écologiques liés au micro-habitat tandis que le type d'habitat local (i.e. feuillus ou résineux) filtre les traits morphologiques liés à la taille (longueur et largeur). En milieu ouvert, la fermeture du

paysage proche filtre les traits écologiques de l'habitat, du micro-habitat et du régime trophique ainsi que certains traits morphologiques liés à la taille, tandis que le type d'habitat local (i.e. prairie ou culture) filtre les traits morphologiques liés à la pigmentation et à la longueur. Ainsi **le type d'habitat local et la structure du paysage proche influencent les assemblages de faune du sol de manière complémentaire. Ce filtrage est propre au type d'habitat avec un filtrage des traits écologiques par l'augmentation du contraste du paysage proche et un filtrage principalement des traits morphologiques par l'intensification locale de l'usage du sol.** Il est notable aussi de constater que dans le cas des milieux ouverts, la fermeture du paysage proche influence la composition du régime trophique de la communauté locale, laissant supposer une meilleure dégradation de la matière organique lorsque le paysage proche se boise et un meilleur enfouissement de cette matière organique lorsque le paysage proche s'ouvre. L'inverse ne s'observe pas dans le cas des milieux fermés lorsque le paysage s'ouvre.

L'hétérogénéité du paysage est connue pour avoir un effet direct sur le maintien de la richesse spécifique. L'augmentation de la diversité des habitats dans le paysage proche, augmente les chances de rencontrer à une station d'échantillonnage particulière des espèces associées à ces différents types d'habitat. L'augmentation de la diversité fonctionnelle dans un milieu donné (fermé ou ouvert) lorsque le contraste du paysage augmente (paysage qui s'ouvre autour d'un milieu fermé ou paysage qui se ferme autour d'un milieu ouvert), à même nombre d'espèces, indique un effet d'hétérogénéité du paysage favorable aux espèces généralistes. La diversité paysagère, synonyme de diversité des ressources, est essentielle dans le maintien des espèces généralistes. Ainsi, lorsque le paysage proche est peu contrasté par rapport au type d'habitat local, on peut s'attendre à avoir localement moins d'espèces généralistes. On peut donc penser que **le remplacement local des espèces dans un habitat, lorsque le paysage proche se contraste, est le fait d'espèces généralistes venant remplacer localement les espèces spécialistes qui ne sont plus capables de s'y maintenir.**

Question 2. TRAITS DE REPONSE & TRAITS D'EFFET :

2.1. Traits de réponse – approche expérimental

2.1.1. Expérience d'exclo-in situ : «Évaluation expérimentale des préférences des collemboles pour le sol et le microclimat dans les communautés de forêt et de prairie »

Le microclimat agricole est défavorable à la plupart des espèces forestières, il en diminue l'abondance, alors que le microclimat forestier est favorable à la plupart des espèces agricoles et généralistes, il en augmente l'abondance. Un certain nombre d'espèces forestières préfèrent le sol de pâturage et un certain nombre d'espèces agricoles préfèrent le sol forestier. Les espèces de ces deux types d'habitats semblent donc soumises à des contraintes différentes. Les patrons de distribution des espèces sont donc le résultat de différents compromis de la part des espèces, ce qui détermine *in fine* leur préférence d'habitat. Le type de compromis mis en œuvre est dépendant de l'habitat préférentiel des espèces (tel que décrit par leurs occurrences). **Les espèces forestières semblent essentiellement dépendre de facteurs abiotiques tels qu'une température plus faible et mieux tamponnée et une humidité du sol plus élevée. Cela dit, certaines d'entre elles montrent clairement une préférence pour le sol de prairie, ce qui indique un compromis entre leur faible tolérance vis-à-vis de la température et de l'humidité du sol, typiques du microclimat de prairie (humidité du sol et température présentant de fortes variations) et leur préférence pour un type de substrat présentant une faible acidité et des ressources trophiques abondantes, notamment en bactéries, liées à une forte activité lombricienne et racinaire telle qu'on la trouve en prairie.** Par ailleurs, les espèces agricoles et généralistes semblent plus sensibles à la nature du sol, déterminant les ressources trophiques et la physico-chimie du sol (telles que le pH ou la quantité de carbone du sol), et/ou à la compétition interspécifique, qu'aux conditions microclimatiques. En effet, un grand nombre d'entre elles préfèrent le microclimat forestier et certaines semblent même préférer le sol de forêt. **La sélection de l'habitat chez les espèces agricoles et généralistes semble donc être conditionnée par un compromis entre une préférence pour certains facteurs microclimatiques (humidité, température), typiques du microclimat forestier, plus tamponné, et une préférence pour un substrat moins acide et/ou un plus faible niveau de compétition (que l'on trouve en prairie).**

Pour résumer, nous avons donc montré que certains processus de compromis entre contraintes biotiques et abiotiques intervenant dans la sélection d'habitat, largement décrits dans la littérature pour de nombreux groupes, peuvent également être appliqués aux collemboles. Le type de compromis auquel les espèces doivent faire face dépend tout d'abord de leur habitat préférentiel tel que décrit par les observations de terrain. Ainsi, **les espèces de forêt font face à un compromis entre leur intolérance vis-à-vis de la dessiccation et leur préférence pour certaines ressources trophiques**

et/ou environnements physico-chimiques typiques des prairies, tandis que **les espèces de prairie font face à un compromis entre un faible pouvoir compétitif et une forte tolérance écophysiological**. D'autre part, certaines espèces de pâturage montrent à la fois une préférence pour le sol et pour le microclimat forestier. Par défaut, nous avons conclu que ces espèces sont aussi exclues du milieu forestier par la compétition avec les espèces spécialistes de forêt.

2.1.2. Expériences en laboratoire : «Les schémas de déplacement des assemblages de collembole impactés par les ressources alimentaires »

Quatre différents groupes d'espèces peuvent être distingués en fonction de leur réponse de mobilité en fonction du traitement. Le groupe 1 est composé des espèces présentant un patron de migration (distance) qui ne diffère pas entre les traitements : *Mesaphorura macrochaeta* et *Friesea truncata*. *Lepidocyrtus lanuginosus*, *Entomobrya multifasciata*, *Sminthurinus signatus*, et *Folsomia quadrioculata* appartiennent à un second groupe avec une distance moyenne couverte sensiblement modifiée par l'ajout de ressources alimentaires mais sans différences entre les traitements microflore et microflore + plante. Le groupe 3 est uniquement composé de *Protaphorura armata* qui a seulement été affectée par le traitement microflore + plante. Enfin, le quatrième groupe est composé d'espèces montrant des centres de masse significativement différents pour chaque traitement : *Isotomiella minor* et *Parisotoma notabilis*.

Si la microflore du sol et les racines des plantes ont un effet attractif sur le déplacement des collemboles plus grand que la microflore seule et si les collemboles épédaphiques se déplacent plus que les formes de vie vivant dans le sol (hémi- et eu-édaphique), ces **types de déplacement pour recherche alimentaire ne semble par contre pas liés au type de forme de vie des collemboles. Cependant l'effet combiné de la microflore du sol et des racines des plantes est d'autant plus grand que collemboles vivent en profondeur**. Par ailleurs, la distance de déplacement des collemboles est espèce-spécifique et ne semble pas, non plus, lié au type de forme de vie.

Il semble y avoir 4 types de déplacement lié à l'exploration du milieu pour la recherche de ressource alimentaire. Certaines espèces sont indifférentes à la présence de microflore ou de racines de plante, d'autres se déplacent dès la présence de microflore alors que pour certaines il faut la présence combinée de racine de plante et de microflore pour provoquer un déplacement. Enfin le dernier type se déplace d'autant plus qu'en plus de microflore il y a aussi des racines de plante.

2.1.3. Expériences en laboratoire : «Influence des communautés de micro-organismes sur le comportement exploratoire des vers de terre »

Nous avons décelé une préférence pour les microorganismes issus d'un sol de forêt chez deux espèces : *L. terrestris* et *A. icterica*. Nous avons également observé une influence significative de la densité d'individus sur le comportement de déplacement des vers de terre. **Avec l'augmentation de la densité intraspécifique, les taux de mouvement commencent par diminuer avant de ré-augmenter aux plus forts niveaux de densité (Erreur ! Source du renvoi introuvable., patron en cloche inverse)**. **Ce patron résulterait d'un compromis entre (1) les mécanismes de construction de niche** (tels que décrits dans Caro 2012) qui peuvent expliquer une diminution du déplacement avec une augmentation du nombre de conspécifiques jusqu'à atteindre un seuil ou les individus sont agrégés **et (2) la compétition intra-spécifique**, qui pousserait les individus à se déplacer au delà d'un seuil critique de densité

Cette étude montre que le comportement exploratoire de l'habitat par les vers de terre est influencé par les communautés de micro-organismes et qu'il diffère selon les espèces. La densité dépendance joue également un rôle dans le taux de mouvement de ces vers de terre lors de leur exploration de l'habitat. Nous montrons également l'existence d'un patron commun à deux espèces de vers de terre (*L. terrestris* et *A. icterica*) pouvant être le fruit d'un compromis entre déterminants (attraction entre conspécifique et compétition intra-spécifique) influençant le déplacement des vers de terre.

2.2. Traits d'effets : étude en cosmes

De nombreuses études ont montré comment les lombriciens participent à *l'agrégation des sols*. Notre étude conforte ce constat car les effets sont complexes et dépendent du type de sols, des espèces ou de l'âge des turricules. Les vers diffèrent dans la magnitude de leurs effets sur la stabilité de la structure des agrégats produits, ayant une activité dé-structurante, nulle ou positive. Par exemple, l'effet de *A. giardi* et des deux autres espèces anéciques sont contradictoires sur le sol limoneux sous grande culture. Ainsi, cela conforte le fait que les catégories éco-morphologiques ne peuvent pas être utilisées comme proxy pour établir des groupes fonctionnels d'effet sur la stabilité des agrégats produits. Peu de différences significatives ont été mises en évidence entre les *activités enzymatiques* mesurées sur les agrégats produits sur un même sol par différentes espèces de ver de terre. L'effet

des vers de terre sur la *minéralisation du carbone* peuvent être (i) direct par la stimulation de la décomposition via la fragmentation et l'incorporation des MOS dans les agrégats et (ii) indirectement en mélangeant les particules et stimulant l'activité microbiologique dans leur tube digestif et dans les turricules. Les vers de terre ont globalement un effet neutre ou de protection de la MOS, la minéralisation étant plus faible que dans les sols initiaux. Mais il apparaît aussi que la minéralisation puisse être augmentée, notamment sur les sols arables ainsi que sur le sol prairial. Cela peut être expliqué par la qualité et/ou la localisation des MOS. Les différences dans le turnover du C (minéralisation vs stabilisation) en présence de vers de terre peuvent être liées à des taux de décomposition rapides associés aux agrégats formés de MO fraîche non protégée vs de la MO stabilisée depuis longtemps dans des micro-agrégats stables. Ici, nous n'observons pas que les espèces endogées ont des effets délétères sur les populations microbiennes et tendent à réduire la respiration du sol ingéré. Ce qui s'explique par le fait que (i) la *minéralisation du C est un processus dynamique* dans les agrégats créés par les lombriciens et (ii) les différences entre espèces *ne peuvent pas être expliquées par l'appartenance aux deux catégories éco-morphologiques*.

Question 3. MODELISATION

3.1. Réponse des communautés de collemboles à la dynamique du paysage: une modélisation multi agent à l'échelle de la population

Le modèle prend en compte les interactions entre espèces en modulant l'abondance d'une espèce par l'abondance des autres espèces présentes dans la parcelle. Pour intégrer, le modèle logistique

devient : $N_{i,j}/dt = r_i N_{i,j} (1 - (N_{i,j} + \alpha \sum_{i=1}^n \text{autres } N_{i,j}) / K_{j,h})$, avec $N_{i,j}$ l'effectif de l'espèce i dans la

parcelle j , r_i la croissance de l'espèce i , $K_{i,h}$ la capacité de charge de la parcelle j du milieu h et α_i l'indice de compétitivité de l'espèce i . L'indice α prend en compte l'effet de la compétition, plus il est bas, plus l'espèce est dominante.

La *dispersion* se fait entre parcelles adjacentes. Elle est modélisée à partir de la dynamique de population et de la capacité limite de charge du milieu, en définissant un *seuil de diffusion* (SD) et un *taux de diffusion*. Le seuil de diffusion fixe le pourcentage de la capacité limite de charge (K) à partir duquel les individus d'une espèce commencent à disperser. Le taux de diffusion définit le pourcentage d'individus qui vont disperser. Dans la parcelle de départ, une espèce avec un seuil de diffusion bas sera une espèce mobile (très densité-dépendante) tandis qu'une espèce avec un seuil de diffusion haut sera une espèce peu mobile (faiblement densité-dépendante). Par ailleurs, à même seuil de diffusion, une espèce avec un taux de diffusion élevé dispersera en plus grand nombre qu'une espèce avec un taux de diffusion bas, ce taux définissant le nombre d'individus de la population qui vont aller disperser.

Le paysage du Morvan, sur lequel se base le modèle, a connu principalement des événements de reforestation et seulement une légère déforestation sur les dernières décennies. A partir du parcellaire de ce paysage, différents scénarios de déforestation ou de reforestation ont été réalisés : (i) scénarios de déforestation partant d'un même taux de boisement (90%) et arrivant à différents taux de boisement (50%, 25% ou 10%) à la fin de la dynamique ; (ii) scénarios de reforestation partant de différents taux de boisement (10%, 25% ou 50%) pour arriver à un même taux de boisement de 90%, (iii) scénario complexe de déforestation brutale, partant d'un taux de boisement de 90%, chutant rapidement à 26 % et suivi d'une légère reforestation tel que le taux de boisement final soit de 39%.

Les paramètres de dynamique de population et d'aptitude à la dispersion permettent de décrire le comportement d'une espèce par rapport à sa préférence d'habitat. Le modèle comprend 5 profils d'espèce : strictement forestière, préférentiellement forestière, strictement agricole, préférentiellement agricole et généraliste. Pour tester si à partir des profils d'espèces tel que définis on peut retrouver les résultats observés dans nos études précédentes, nous avons défini 45 *plans d'expérience* (i.e. conditions initiales des simulations) (5 combinaisons de profils d'espèces X 3 niveaux de profils de peuplements en milieu forestier X 3 niveaux de profils de peuplements en milieu agricole) à partir desquels faire tourner le modèle. Ceci permettra de comparer les résultats par profil au sein d'un plan d'expérience et entre les plans d'expérience puis d'explorer la réponse du modèle aux différents scénarios.

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

Très peu d'études utilisent la faune du sol pour tester les modèles de fonctionnement de ces communautés. A notre connaissance, c'est la première tentative pour analyser l'effet conjoint des facteurs locaux et paysagers. Majoritairement, les peuplements de faune du sol sont pilotés par une adéquation à la niche écologique mais la dispersion semble aussi jouer un rôle. Le projet TRACES confirme le rôle du paysage proche dans la nature des assemblages locaux d'espèces de la faune du sol. Ainsi, **en termes de gestion et d'aménagement des paysages** :

- ✓ Les facteurs environnementaux sont plus importants que les facteurs spatiaux pour expliquer la présence et la distribution de la faune du sol. Cela signifie que l'on peut avoir un impact sur la présence de la faune du sol en améliorant les conditions locales de l'habitat. Ceci peut passer par l'amélioration des propriétés du sol (amendement améliorant le pH, le statut organique, la minéralisation dans les zones agricoles, bois mort laissé en place au sol dans les zones forestières), ce qui va favoriser le développement des populations de faune du sol en apportant des ressources trophiques et une plus grande qualité d'habitat.

- ✓ La configuration plus que la composition du paysage proche a un effet sur la structuration des communautés de faune du sol et représente souvent autant voire plus d'effet que les facteurs locaux. Cela signifie que l'on peut avoir un impact sur la présence de la faune du sol autant en améliorant les conditions locales de l'environnement (i.e. la qualité de l'habitat) qu'en modifiant la configuration du paysage proche. De petites mosaïques diversifiées entre agriculture et éléments boisés plutôt que de grands openfields ou zones forestières semblent plus favorables à la faune du sol. Cependant la stabilité du paysage permet également à cette faune de s'installer dans les habitats composant ces mosaïques paysagères. Cela signifie que les résultats d'un aménagement du paysage proche ne seront pas immédiats contrairement sans doute à l'amélioration des conditions locales de l'habitat.

- ✓ Enfin, la dépendance des facteurs locaux vis-à-vis de la structure du paysage proche semble liée à la plus forte dépendance spatiale des facteurs locaux ou à la plus grande stabilité du paysage. Il est cependant fort possible que ces deux phénomènes agissent conjointement. Ceci rend les conclusions en termes d'aménagement plus difficile à faire car en Normandie les sols les plus pauvres supportent les habitats forestiers. Ainsi, si l'on souhaite établir de petites mosaïques diversifiées, telle que juste préconisée, l'installation autour de parcelle agricole d'éléments boisés dans le paysage proche devrait donc se faire, dans ce cas, plutôt sur des terres fertiles.

D'autre part, **en terme de gestion et d'aménagement**, comme quel que soit le milieu (ouvert ou fermé) la diversité fonctionnelle de la faune du sol augmente lorsque le paysage proche se contraste (i.e. se ferme ou s'ouvre) et comme une intensification de l'usage local du sol (ouvert ou fermé) entraîne une perte de redondance fonctionnelle au sein de ces communautés de faune du sol (ce qui les fragilise), **il semble souhaitable, pour améliorer la stabilité fonctionnelle des communautés de faune du sol, de désintensifier l'usage du sol local et d'augmenter le contraste du paysage proche**. L'échelle d'analyse de la mosaïque paysagère étant, dans notre cas d'étude, de l'ordre de 1 ha, cela revient à promouvoir le maintien ou à mettre en place de petites mosaïques d'habitats diversifiés. Cela permettrait sans doute également de favoriser une communauté du sol apte à gérer les aléas environnementaux car favorisant la redondance fonctionnelle au sein des communautés.

Par ailleurs, la fermeture du paysage autour d'un milieu ouvert en changeant la distribution des régimes trophiques au sein de la communauté de faune du sol, pourrait favoriser la dégradation de la matière organique (plus grande proportion de détritivore) tandis que dans un openfield la matière organique serait mieux enfouie (plus grande proportion de géophage). Dans le cas des milieux ouverts, le maintien ou la mise en place de petites mosaïques d'habitats boisés pourrait ainsi permettre d'optimiser le cycle de la dégradation de la matière organique tandis que le maintien d'openfields optimiserait la structuration des sols, ceci à niveau d'abondance similaire. Ce qui signifierait qu'en termes d'aménagement du paysage il faudrait aussi réfléchir les conséquences en termes d'optimisation des services écosystémiques. Par exemple ici, en raisonnant à niveau d'abondance similaire, entre la provision d'un service de support (le cycle de la matière organique favorisant la production de biomasse) et la provision d'un service de régulation (la structuration des sols favorisant un meilleur cycle de l'eau), l'un serait avantagé en milieu ouvert par l'hétérogénéité de la mosaïque du paysage proche au détriment de l'autre, et vis et versa en cas d'homogénéisation du paysage proche.

A une **échelle micro-locale**, échelle où les espèces vont avoir un impact sur le fonctionnement du sol, il n'a pas été possible de conclure sur des traits particuliers pouvant être utilisé comme indicateur du maintien d'une fonction donnée au sein d'une communauté, les réponses des espèces (que ce soit de

collembolles ou de vers de terre) à l'exploration de l'habitat ou les effets de ces espèces sur la structure et le fonctionnement du sol étant généralement idiosyncratiques.

En ce qui concerne les traits d'effets, **la réponse des espèces de vers de terre semble globalement dépendante du type de sol et du type de couvert végétal**. Cette idiosyncrasie ne permet pas de faire, en l'état actuel de nos connaissances, des généralités sur l'effet des vers de terre sur le fonctionnement du sol. Notre hypothèse de départ qu'il serait possible d'établir des groupes fonctionnels d'effet des espèces lombriciennes n'est donc pas vérifié. La réalité semble beaucoup plus complexe. En effet :

- La production de turricules est fonction du type de sol, du couvert végétal et du type d'espèce. Il est observé seulement dans le cas des sols décarbonatés une production de turricule plus forte.

- L'idée reçue selon laquelle les vers de terre en agrégeant le sol augmentent sa stabilité structurale n'est pas toujours vérifiée ici. Dans notre cas, la réponse est fonction du type de sol et du type de vers de terre. La stabilité structurale des turricules est plus faible que celle du sol dans les sols sableux et sous prairie quelque soit le type de sol. Cependant sous grandes cultures, la stabilité structurale des turricules est plus forte que celle du sol.

- Dans les prairies et pelouses, quelque soit le type de sol, il y a moins d'activité enzymatique et plus de substrat disponible, ce qui signifie qu'il y a assez à manger pour les vers de terre, lesquels n'ont donc pas besoin de modifier les activités enzymatiques. Cependant dans les cultures annuelles, en fonction du type de sol, ce sont différents substrats et différents cycles biogéochimiques qui sont bloqués.

- Sous pelouse, globalement il n'y a pas d'effet des vers de terre sur la minéralisation du carbone. Cependant les patrons de réponse de minéralisation du carbone sont dépendants du type de sol et du type de vers de terre.

- Les turricules de vers de terre sont des puits ou des sources de carbone dans les sols en fonction de l'âge du turricules, cependant globalement les vers de terre tendent à limiter la minéralisation du carbone.

En terme de gestion, il semble que l'on puisse dire que dans les prairies et pelouses, quelque soit le type de sol, il n'est pas besoin d'apporter de la matière organique pour favoriser le développement des populations de vers de terre. Cependant, **étant donnée la spécificité des réponses, il est encore trop tôt pour recommander des pratiques de gestion permettant d'améliorer tel ou tel cycle biogéochimique**, ceux-ci semblent plus dépendants du type de sol que du couvert de culture annuelle. Ainsi, **les groupes écologiques de vers de terre ne semblent pas être indicateur de la stabilité structurale du sol ou de niveau de minéralisation dans les sols**. Le lien entre traits d'effet et traits de réponse semble plus complexe que de prime abord, les effets de vers de terre sur le fonctionnement du sol ne se rattachent ni à un groupe écologique, ni à un type de sol, ni à un type de couvert végétal.

Partenariats mis en place, projetés, envisagés

Sur la durée de ce projet, des partenariats se sont développés :

- au sein de l'unité PESSAC, intra-unité avec O.Crouzet
- au sein de l'unité ECOBIO, inter-unité avec M.Legras
- au sein de l'unité BIOEMCO, inter-unité avec N.Marilleau

Ce projet a également bénéficié aux travaux de deux thèses : C.Heiniger (codirection : Barot & Dubs) et B.Richard (codirection : Decaëns & Legras).

Par ailleurs, certains des partenariats existants ou mis en place se sont concrétisés par de nouvelles collaborations dans d'autres projets de recherche :

- le projet BETSI « Biological and Ecological functional Traits of Soil Invertebrates (BETSI) to link species assemblages to environment factors » (porteur : Hedde, M.) (CESAB-FRB, 2011-2013). Ce projet BETSI a pour but de synthétiser et d'organiser les informations sur les traits fonctionnels biologiques et écologiques des invertébrés des sols. Il s'agit d'un consortium de partenaires couvrant un large spectre d'organismes de la macro- et mésofaune des sols et donc un large spectre de stratégies biologiques. L'approche sur les traits fonctionnels flous à bénéficier des travaux des réflexions et des travaux menés dans ce projet.

- le projet « PAYSAGE & Microarthropodes de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (PAMIOPE) (porteur : Dubs, F.) (SOERE OPE 2012-2013) qui va permettre de poursuivre le développement du modèle multi-agents commencer dans le projet TRACES.

Liste des opérations de valorisation et de transfert issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	Chauvat M. Perez G. Ponge JF. 2014. Foraging patterns of soil springtails are impacted by food resources. <i>Applied Soil Ecology</i> . 82 :72–77.
Publications scientifiques à paraître	
Publications scientifiques prévues	<p>Dubs F. Decaëns T. Hedde M. Chauvat M. Ponge JF. <i>In prep.</i> Metacommunity patterns of soil fauna along landscape simplification gradients. <i>Oecologia</i>.</p> <p>Dubs F. Pey B. Hedde M. Nahmani J. Decaëns T. <i>In prep.</i> Neighbouring landscapes and land use patterns shape functional diversity of soil fauna. <i>Ecography</i>.</p> <p>Heiniger C, Barot S, Ponge JF, Salmon S, Meriguet J, Carmignac D, Suillerot M, Dubs F. <i>In prep.</i> Experimental assessment of collembola preferences for soil and microclimate in forest and pasture communities. <i>Oecologia</i></p> <p>Richard B, Coulibaly S, Legras M, Decaëns T, Chauvat M. <i>In prep.</i> Should I stay or should I go: attractiveness of microbial community for earthworm's exploration. <i>Journal of Animal Ecology</i>.</p> <p>Hedde M. Petraud JP. Thénard J. Dubs F. <i>Soumis.</i> Casts as earthworm functional traits of effect on soil aggregation. <i>Geoderma</i>.</p> <p>Hedde, M., Marraud C., Petraud JP, Crouzet O. <i>In prep.</i> Unpredictability of earthworm functional traits of effects. <i>Soil Biology and Biochemistry</i>.</p> <p>Dubs F. Marilleau N. Barot S. Ponge JF. <i>In prep.</i> Biodiversity response to landscape dynamics: an individual-based model of springtails at population level. <i>Ecological Modelling</i>.</p>
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	<p>Dubs, F. Barot, S. Blouin, M. Chauvat, M. Decaëns, T. Hedde, M. Ponge, JF. Salmon, S. Les TRAits de la faune du sol pour relier les Changements Environnementaux aux fonctions du Sol. Spread presentation & poster. <i>Ecologie</i> 2010. Montpellier. 1 au 3 Sept. 2010</p> <p>Dubs, F. Bolger, T. Csuzdi, C. Eggleton, P. Haini, J. Watt, A. Functional response of assemblage earthworm along a gradient of land-use intensity: pan-european study. International colloquim on XVI ICSZ Coimbra, Portugal ; 6 au 10 août 2012</p> <p>Heiniger, C. Dubs, F. Ponge, JF. Salmon, S. Carmignac, D. Meriguet, J. Barot, S. Experimental design disentangling habitat preferences and interspecific competition as constraints structuring collembolan species assemblages. Poster. International colloquim on Apterigota Coimbra, Portugal ; 13 et 14 août 2012</p> <p>Dubs, F. Ponge, JF. Salmon, S. Collembolan functional response to landscape intensification Oral. International colloquim on Apterigota Coimbra, Portugal ; 13 et 14 août 2012</p>
Participations futures à des colloques	Dubs F, Pey B, Hedde M, Decaëns T. Neighbouring landscape and land use shape the local functional diversity of soil fauna. First Global Soil Biodiversity Conference, 2-5 Decembre 2014, Dijon
THÈSES	
Thèses passées	<p>Heiniger C. 2013. Facteurs de structuration des assemblages locaux d'espèces de collembole. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. 188p. – Chapitre 5 : Experimental assessment of Collembola preferences for soil and microclimate in forest and pasture communities : 127-163.</p> <p>Richard, B. 2012. Règle d'assemblage des communautés d'Oligochètes terrestres et relations avec les microorganismes du sol. Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen. 122p. – Chapitre 5 : Influence des communautés de micro-organismes sur le comportement exploratoire des vers de terre : 78-89.</p>
Thèses en cours	
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de	

valorisation parus

Articles de
valorisation à
paraître

Articles de
valorisation prévus

AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS

Actions vers les
médias
(interviews...)
effectuées

Actions vers les
médias prévues

ENSEIGNEMENT – FORMATION

Enseignements/for
mations dispensés EMISCOE'2013 « *Ecole de Modélisation Informatique des Systèmes Complexes Ecologiques* ». 10-14 juin 2013 Campus IRD France Nord, Bondy France
Master EBE. Module Ecologie des Sols. M2. 2010-2013 Déterminants des peuplements de faune du sol

Enseignements/for
mations prévus Master EBE. Module Ecologie des Sols. M2. 2014 Déterminants des peuplements de faune du sol

EXPERTISES

Expertises menées

Expertises en cours

Expertises prévues

METHODOLOGIES (GUIDES...)

méthodologies
produites

méthodologies en
cours d'élaboration

méthodologies
prévues

AUTRES

Stages
Simonneau, S. 2010. Déterminer, renseigner et coder les traits d'un pool d'espèces de collembole afin d'expliquer les patterns d'assemblage. Master EBE. Université Paris VI.
René-Corail, P. 2011. Définir et coder les traits d'un pool d'espèces de collemboles pour analyser les assemblages locaux. Master Bioressources. UPEC
Legeay, J. 2011. Renseignement des traits d'espèces de la macrofaune du sol. Licence. Université d'Orsay.
Barnier, F. 2011. Identification, renseignement et codage des traits de communauté locale de lvers de terre. Master Bioressources. UPEC
Thevenin, C. 2011. Modélisation par système multi-agents appliquée à la biodiversité locale des microarthropodes du sol. Master EBE. Université Paris VI.
Pettavino, M. 2011. Effet de l'usage et du type de matrice paysagère sur la diversité de taxa du sol. Master EBE. Université Paris VI.
Suillerot, M. 2001. Etude des collemboles d'un milieu prairial et d'un milieu forestier du parc naturel régional du Morvan (Bourgogne). Licence. Université d'Orsay.